

Control y simulación de tráfico urbano en Colombia: Estado del arte¹

Urban Traffic Control and Simulation in Colombia: Literature Review

59
técnica

Recibido 31 de marzo de 2009, modificado 1 de julio de 2009, aprobado 5 de julio de 2009.

Daniel Robles

Estudiante de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

d-robles@uniandes.edu.co ✉

Pablo Nãñez

M.S., Profesional Asistente de Proyecto del Departamento de Ingeniería Civil para el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados CIACUA, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

pa.nanez49@uniandes.edu.co ✉

Nicanor Quijano

PhD. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

nquijano@uniandes.edu.co ✉

PALABRAS CLAVES

Control de señales de tráfico, control de tráfico urbano, ingeniería de tráfico, simulación, sistemas inteligentes de transporte, tráfico vehicular

KEY WORDS

Intelligent transportation systems, road traffic, simulation, traffic control, traffic engineering, traffic light signal control, urban traffic control.

RESUMEN

Las condiciones actuales de la movilidad en Colombia generan interrogantes acerca de qué tan apropiadas son las estrategias de control de tráfico aplicadas en las redes urbanas del país. Con esto en mente, se plantea una revisión de las estrategias de control y plataformas de simulación de sistemas de tráfico más utilizadas en Colombia y en otras partes del mundo; con el propósito de caracterizar el nivel de desarrollo del país en el estudio e implementación de estrategias de control de tráfico urbano y, posteriormente, formular propuestas orientadas hacia la mejora de la movilidad urbana en el país.

ABSTRACT

The current mobility conditions in Colombia give place to questions about the suitability of the traffic control strategies applied on the Colombian urban networks. Therefore, a review of the control strategies and simulation platforms used in Colombia and around the world is shown. This is done to characterize the level of development of the country, in terms of research and implementation of such control strategies and, furthermore, to formulate proposals oriented towards the improvement of the Colombian urban mobility.

¹ Este trabajo fue apoyado en parte por el Plan de Apoyo a Profesores Asistentes, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.

INTRODUCCIÓN

Debido al rápido crecimiento de los sistemas de tráfico urbano en términos de demanda y complejidad, el estudio de este tipo de sistemas ha adquirido cada vez más importancia tanto en entornos académicos, como por parte de administraciones gubernamentales alrededor del mundo. En este sentido, la mayoría de los esfuerzos invertidos en el área han estado encaminados hacia el desarrollo de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, por sus siglas en inglés) [1, 2], más seguros y eficientes a través de la utilización óptima de la infraestructura disponible (e.g., intersecciones semaforizadas, sistemas de autopistas). Teniendo en cuenta que el control de tráfico en redes urbanas se hace principalmente a través del manejo de los semáforos en intersecciones [3, 4, 5] y que en Colombia a grandes rasgos no existen sistemas de autopistas apropiadamente desarrollados, resulta relevante analizar las alternativas disponibles en la actualidad para llevar a cabo una gestión apropiada de control sobre las intersecciones semaforizadas.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las actuales condiciones de la movilidad en nuestro país [6] (donde las principales áreas metropolitanas sufren graves consecuencias de la implementación de estrategias de control convencionales basadas en métodos desarrollados entre los años de 1970 y 1980), es relevante preguntarse si la manera en la que estamos controlando el tráfico urbano es la más apropiada para nuestro entorno, entendiendo que no existe una sola alternativa que genere soluciones adecuadas para cualquier contexto [7] (debido a la presencia de condiciones únicas y específicas de infraestructura vial, idiosincrasia de la población, entre otras). ¿Existe, acaso, una estrategia de control de tráfico urbano que satisfaga las necesidades de movilidad en Colombia? ¿Deberíamos enfocar nuestros esfuerzos hacia el desarrollo de una nueva, completamente adaptada a nuestro entorno, que responda eficazmente a cambios repentinos en la demanda, aproveche a cabalidad la infraestructura disponible, mejore los niveles de contaminación en nuestras ciudades y aumente la seguridad de las vías?

Con el propósito de brindar respuestas a este tipo de interrogantes, se realiza una revisión de las estrategias de control de tráfico urbano más utilizadas globalmente y aquellas que más uso tienen actualmente en Colombia, con énfasis en el caso de Bogotá. Del mismo modo, teniendo en cuenta que la aplicación de cualquier método de control de tráfico debe hacerse sobre una base sólida de validación en simulación, se plantea una revisión comparativa de las plataformas de simulación de sistemas de tráfico más utilizadas para dicho propósito en el mundo y en Colombia.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la segunda sección se presenta una revisión de las estrategias de control más utilizadas en redes urbanas. Más adelante, en la tercera, se resumen las principales plataformas de simulación utilizadas alrededor del mundo y en el país. Finalmente, en la última sección se presentan una serie de conclusiones y sugerencias.

ESTRATEGIAS DE CONTROL EN REDES URBANAS

Como ya ha sido mencionado, la importancia, el alcance y las consecuencias de los problemas de tráfico urbano han generado, desde hace varias décadas, un marcado interés por el estudio y desarrollo de estrategias de control que se adapten y solucionen este tipo de situaciones, que se han caracterizado por altos tiempos de espera para cada vehículo en la malla vial y/o bajos volúmenes de flujo dentro de la misma [3, 7–16]. Sin embargo, recientemente se ha observado un aumento en el interés por el desarrollo de modelos y estrategias de control que procuren el beneficio de sistemas de transporte masivo en vez de incentivar el flujo indiscriminado de vehículos como se muestra en [1, 17–24], entre otros.

Actualmente, en la ciudad de Bogotá, el control del sistema de semaforización electrónica está basado en las recomendaciones metodológicas alemanas RILSA (Richtlinien für Lichtsignalanlagen, 1992), mientras que el análisis de la capacidad y nivel de servicio de

la infraestructura vial se realizan utilizando una adaptación del HCM (Highway Capacity Manual, 2000) [25]. El manual RILSA consiste en un compendio de consideraciones y recomendaciones a tener en cuenta para la gestión a nivel macroscópico de la localización y puesta en servicio de señales semafóricas (incluyendo el cálculo de intersecciones coordinadas como ola verde), que considera variaciones en la demanda del tránsito en la malla vial sobre períodos de tiempo largos. Del mismo modo, el manual constituye una guía para el diseño a nivel microscópico para la programación de intersecciones individuales y redes coordinadas, a través de la implementación tanto de planes de señales con tiempos fijos, como de planes de señales que se ajustan a la demanda o incluso la conformación mixta del plan de señales [25].

Cabe anotar que, a pesar de que la metodología RILSA permita el control de señales tanto en lazo abierto (plan de señales de tiempo fijo) como cerrado (plan de señales sensible a la demanda), la falta de una iniciativa clara por parte de la mayoría de las administraciones distritales ha llevado a que sólo se implementen planes de señales de tiempos fijos que, según [3], cuentan con un desempeño menos satisfactorio que aquellos que se ajustan a la demanda. Adicionalmente, si bien varios de los parámetros recomendados por la metodología RILSA han sido adaptados con el propósito de que sea posible realizar una caracterización más apropiada del tráfico urbano en la capital colombiana, vale la pena preguntarse si esta metodología es la más apropiada para la ciudad. Para poder responder esta pregunta, es necesario identificar las estrategias existentes alrededor del mundo para el control de sistemas de tráfico urbano a través de intersecciones semaforizadas. Con el propósito de enumerar estas estrategias, se utiliza como base la clasificación efectuada en [3], con base en el tipo de control ejercido (en lazo abierto o cerrado), y la interacción con las intersecciones circundantes (aisladas o coordinadas), como se muestra a continuación.

ESTRATEGIAS DE TIEMPO FIJO

Haciendo uso de registros históricos de flujo y densidad vehicular, las estrategias de tiempo fijo son ajustadas para períodos de tiempo largos donde dichos parámetros se asumen constantes. Lo anterior puede, entonces, resultar poco acertado en contextos con demandas de alta variabilidad o con usual presencia de condiciones no convencionales (e.g. accidentes, disturbios, eventos), y conlleva el hecho de que este tipo de estrategias sólo pueda ser aplicado bajo condiciones no saturadas de la vía. A continuación, se hace un breve resumen de las técnicas y algoritmos más representativos que conforman las estrategias de tiempo fijo, primero, desde el enfoque de intersección aislada y, luego, desde el punto de vista coordinado.

Control de intersecciones aisladas con tiempos fijos

En este tipo de estrategias, los valores de tiempos de verde y de fase para el sistema son optimizados off-line con base en registros históricos del tráfico. Los ejemplos más conocidos en este tipo de estrategias son SIGSET Y SIGCAP [26, 27], las cuales operan bajo variaciones de la restricción que acota a la oferta neta de recursos por encima de la demanda de cada una de las entradas a la intersección. La principal diferencia entre los algoritmos mencionados se basa en que SIGSET procura minimizar el tiempo total de espera para una intersección con unas demandas dadas, mientras que SIGCAP maximiza la capacidad de las intersecciones.

Control coordinado de intersecciones con tiempo fijo

Debido a su buen desempeño en condiciones de no saturación y a que no requieren de la instrumentación necesaria para medir el estado de las redes en tiempo real (lo cual se ve reflejado directamente en sus bajos costos de implementación), estas estrategias son las más utilizadas alrededor del mundo [2]. Dentro de este tipo de estrategias se encuentran ejemplos como MAXBAND y UTCS que procuran maximizar el ancho de banda de avenidas principales, y TRANSYT

que implementa un algoritmo evolutivo de optimización por gradiente sobre un indicador de desempeño determinado (e.g., el número total de paradas de los vehículos) [3]. Cabe resaltar que es la estrategia MAXBAND la que introduce el concepto de las denominadas olas de verde, en la que se busca maximizar el número total de vehículos que pueden viajar a través de una vía principal a determinada velocidad sin parar en ninguno de los semáforos dispuestos a lo largo de ésta.

ESTRATEGIAS DE CONTROL SENSIBLES AL TRÁFICO

A diferencia de los casos expuestos anteriormente, las estrategias de control sensibles al tráfico ejecutan su lógica de actuación con base en mediciones de tráfico realizadas en tiempo real, en las entradas a las intersecciones. Es claro que para llevar a cabo estas mediciones es necesario contar con algún tipo de detectores de tráfico, que pueden variar desde los usuales bucles inductivos [3] hasta tecnologías más sofisticadas de manejo de señales de video, entre otras. Al igual que en el caso de las estrategias de control con tiempos fijos, cabe hacer la diferenciación con base en el tipo de aproximación en términos de la interacción entre las intersecciones.

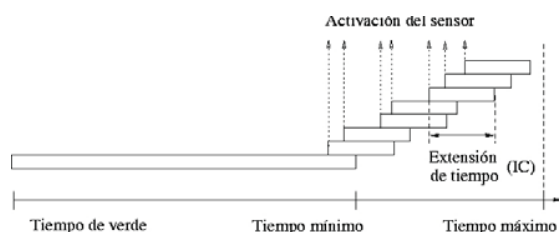


Figura 1. Ilustración de la Operación del Método de Intervalo de Vehículos. Figura adaptada de [28].

Control sensible al tráfico de intersecciones aisladas

Entre las estrategias más relevantes dentro de esta categoría se encuentra el denominado “Método de Intervalo de Vehículos” y su versión evolucionada, MOVA. En general, ambas estrategias son procesos iterativos que incrementan el tiempo asignado de verde para cada señal con base en una condición observada en un período de tiempo determinado. La princi-

pal diferencia entre ambos algoritmos radica en que el primero incrementa el tiempo de verde cada vez que se detecta un vehículo dentro de un intervalo crítico (IC) de tiempo recalculado en cada iteración (como se ilustra en la Figura 1); mientras que el segundo realiza, con una periodicidad determinada, un análisis de costos y beneficios sobre la decisión de cambiar de fase en la iteración actual o en la siguiente.

Una ventaja importante de MOVA sobre su predecesor es el hecho de que, bajo condiciones no saturadas, el procedimiento resulta en la optimización de los retardos o paradas, mientras que en condiciones saturadas procura maximizar la capacidad [3]. Igualmente, la flexibilidad obtenida sobre la definición de la función de costos y beneficios ha incentivado el desarrollo de esta estrategia incluso para ser implementada en ambientes con prioridad para autobuses, como se documenta en [19].

Control sensible al tráfico de intersecciones coordinadas

Además de la diferenciación efectuada entre las estrategias de control coordinado de intersecciones de tiempo fijo y aquellas sensibles al tráfico, es necesario hacer una distinción con base en la distribución de la inteligencia del algoritmo. En el caso de las estrategias centralizadas, la información recopilada por el sistema de sensores es enviada a un centro de control de tráfico urbano, donde es procesada para calcular los tiempos óptimos; estos tiempos son entonces enviados a cada controlador de semáforos. Algunos ejemplos de estas estrategias son SCOOT, SCATS, RHODES, MOTION y TUC, entre otras. En contraposición, dentro de las estrategias descentralizadas (i.e., donde la inteligencia de control se encuentra distribuida a través de la red) se tienen algoritmos como UTOPIA, PROLYN y OPAC, entre otras [29].

Dentro de la categoría general de control sensible al tráfico de intersecciones coordinadas se encuentran SCOOT y los “métodos de optimización basados en modelos”. La primera es considerada una versión de TRANSYT sensible al tráfico debido a que, a pesar de compartir una filosofía similar (procurando mi-

nimizar la suma de las colas promedio en el área a través de un proceso iterativo de optimización por gradiente), SCOOT toma como entrada adicional los datos reales de los volúmenes de tráfico en el sistema y no los datos históricos [30, 31]. En cambio, los métodos de optimización basados en modelos (entre los que se cuentan algoritmos conocidos como OPAC, PROLYN, CRONOS y RHODES) llevan a cabo un acercamiento mucho más riguroso (y costoso en términos de tiempo de cálculo) al problema de encontrar el tiempo óptimo para el cambio de estado.

Queda claro, entonces, que aunque las autoridades distritales cuentan actualmente con herramientas y alternativas para controlar el tráfico urbano, las condiciones actuales del tránsito, experimentadas por todos los ciudadanos, señalan la necesidad de implementar estrategias alternativas que exploten mejor los recursos de control existentes y, a la vez, mejoren la situación de movilidad. Esta necesidad se ve acentuada en mayor medida al considerar que, según [32], en el año 2003 un minuto de espera en una intersección semaforizada en la Avenida Caracas tenía un costo de \$80 para cada automóvil y de \$45 para cada bus articulado. Al ponderar estos costos con los volúmenes respectivos y teniendo en cuenta todas las intersecciones presentes en un tramo representativo de dicho corredor vial, se observa que los costos por minuto de demora ascienden a \$3.875.956,35 para usuarios privados y a \$34.568.784,00 para usuarios públicos, lo cual resulta más que crítico en economías como la colombiana (en su momento, dichas sumas representarían aproximadamente 115,82 salarios mínimos mensuales). Estas cifras acrecientan la preocupación acerca de la pertinencia de las estrategias utilizadas actualmente e impulsan la exploración de nuevas alternativas.

Por esta razón, y debido a que nacen en un contexto en que la movilidad urbana es un factor crítico, es valioso observar los esfuerzos que se han hecho recientemente en el país para crear y/o adaptar estrategias de control de tráfico urbano. Entre las iniciativas más importantes se encuentran estudios presentados

como proyecto de grado como los de Cuevas [33], Mira [20] y Ñañez [34], de la Universidad de los Andes, Cano [35] y Castro [36] de la Universidad Nacional de Colombia, Nantes [37] de la Escuela Colombiana de Ingeniería y Jaramillo [38] de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Adicionalmente, entre los proyectos académicos que han propuesto de manera teórica estrategias de control de tráfico sobre entornos urbanos de Colombia durante la última década, se cuentan los estudios [20, 32, 33, 35–37, 39] para Bogotá, [40] para Popayán, [38] para Medellín y [41] para Manizales.

Entre estos estudios se resalta en [20] una temática de especial interés, debido a que se enfoca en el beneficio de modos de transporte más sostenibles (e.g., transporte masivo), en vez de buscar el uso indiscriminado de vehículos particulares. Esto está alineado con las actuales estrategias de la mayoría de las administraciones distritales y municipales del país y alrededor del mundo. También en este contexto, en [22] se resumen los diferentes tipos de estrategias alternativas de control de tráfico urbano que realizan la priorización para la asignación de tiempos de fase en las intersecciones con base en la cantidad de pasajeros, transportada en cada movimiento, a diferencia de otros tipos de estrategias en las que se busca maximizar la cantidad de vehículos que transitan a través de la malla vial.

Igualmente, en [20], el autor identifica la problemática actual de la movilidad en Bogotá y plantea al Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM) Transmilenio como una de las principales herramientas para su mejora. Por esta razón, propone soluciones de coordinación de intersecciones semaforizadas que favorezcan a los usuarios de Transmilenio por encima de los usuarios de vehículos particulares (i.e., la implementación de olas verdes y súper expresos, entre otras). De esta manera, [20] realiza un trabajo de campo para caracterizar el corredor vial y, en simulación, aplica diversas alternativas de control para las intersecciones semaforizadas. Se concluye que la implementación de estrategias de control coordinado que favorezcan el

transito de los buses articulados generaría diversas ventajas, tanto para los operadores del servicio (aumentando los recursos disponibles para ser reinvertidos en el mejoramiento del sistema), como para los usuarios. Esta conclusión se ve reforzada en [4, 5], donde se identifica que el comportamiento de las intersecciones señalizadas es la más importante fuente de obstrucción vehicular (determinando en gran medida la capacidad de las vías), aún en un caso como el de Transmilenio en que las paradas de los buses articulados en las diversas estaciones representan fuentes adicionales de discontinuidad en el flujo y demoras.

Es importante anotar que en [22, 24] se indica que, para aplicar las estrategias de control propuestas, es necesario conocer la posición exacta de cada bus, aprovechando las ventajas de las tecnologías Automatic Vehicle Location (AVL). Si bien esto es trivial para un caso como el del SITM Transmilenio², hace que la implementación de este tipo de estrategias sea casi imposible en contextos como los de la mayoría de las ciudades colombianas. Sobre entonces recalcar lo valiosas que resultan estas características de observabilidad y controlabilidad, no sólo para gestionar el sistema de transporte, sino para generar indicadores de desempeño del sistema y evaluar tanto su situación actual como las estrategias de control de tráfico aplicadas en él.

PLATAFORMAS DE SIMULACIÓN MÁS UTILIZADAS

Debido a que en problemas con características de complejidad y magnitud como el de control de tráfico urbano no es viable validar las estrategias de control directamente sobre la malla vial, la utilización de plataformas de simulación se encuentra fundamentalmente ligada a las estrategias de control de tráfico urbano. Por esta razón, es importante identificar

qué plataformas de simulación se están utilizando en Colombia y en otros países, tanto por la comunidad académica en general como por las autoridades distritales y municipales a través de consultorías por parte del sector privado para llevar a cabo su gestión.

Por la gran cantidad de plataformas de simulación existentes, se hace necesario llevar a cabo una categorización adecuada para sintetizar las diferentes alternativas. Las plataformas de simulación pueden, entonces, ser clasificadas de acuerdo al modelo de tráfico que utilicen. Estos modelos pueden ser macroscópicos, microscópicos o mesoscópicos [3].

- *Modelos macroscópicos*: Este tipo de modelos es, en general, apropiado para aplicaciones de gran escala donde las principales variables de interés se encuentran relacionadas con las características del flujo [29, 43, 44]. Su calibración puede llevarse a cabo de manera relativamente sencilla utilizando, por ejemplo, sensores de bucle inductivo [45]. Entre las plataformas de simulación macroscópica más relevantes se encuentran TRANSYT-7F, VISUM, FREFLO, NETVACI, TransCAD, KRONOS, AUTOS, EMME/2, METANET y METACOR [1].
- *Modelos mesoscópicos*: Los modelos mesoscópicos presentan una aproximación intermedia entre los microscópicos y los macroscópicos en la medida en que mezclan conceptos y herramientas de ambos modelos al analizar el comportamiento de grupos de conductores [3, 29]. Las plataformas de simulación que utilizan modelos mesoscópicos son, entre otras, METROPOLIS, DYNASMART, DYNAMIT e INTEGRATION [1].
- *Modelos microscópicos*: Estos modelos, como su nombre sugiere, presentan la escala más pequeña para el acercamiento al análisis de los sistemas de tráfico urbano. En este sentido, sus variables de interés se relacionan con el comportamiento de vehículos

² Este sistema se encuentra controlado y monitoreado detallada y constantemente desde el Centro de Control por el Sistema de Ayuda a la Explotación SAE, desarrollado para la entidad por la compañía ETRA [42].

individuales respecto a la infraestructura y a los demás vehículos en ella. Cabe anotar que el hecho de que este tipo de modelos procuren representar comportamientos humanos aumenta en gran medida su complejidad y costos. Entre las plataformas de microsimulación más relevantes están INTRAS, FRESIM, MITSIM, NETSIM, CORSIM, VISSIM, THOREAU, FLEXSYT-II y AIMSUM [1, 7, 46, 47].

Actualmente, en Colombia la Secretaría de Tránsito local de la ciudad de Manizales utiliza para la planificación y gestión del control de tráfico plataformas comerciales como el ya mencionado TransCAD en conjunto con la herramienta GIS (Geographic Information Service) MAPTITUDE [41], mientras que las autoridades distritales de la ciudad de Bogotá utilizan para llevar a cabo la planeación del transporte urbano plataformas como Emme/2, TransCAD y VISUM. De manera adicional, para desarrollar los procesos de planeación, evaluación, optimización y simulación de los elementos que intervienen en el problema del tránsito, la Secretaría de Tránsito y Transporte (STT) de Bogotá utiliza diversas plataformas comerciales dependiendo de las características específicas de cada situación, divididas en las siguientes categorías [25]:

- Software para planeación y evaluación: HCS2000.
- Software para evaluación y optimización: SIDRA, TRANSYT-7F y SYNCHRO.
- Software para microsimulación: LISA+, TSIS y VISSIM.

Como se ha dicho, la utilización específica de una (o varias) de estas plataformas se realiza con base en las fortalezas, debilidades y alcance identificados para cada paquete de software, contrastados con las características de la situación particular a analizar. Sin embargo, puede ser apropiado resaltar la presencia del software VISSIM en la lista anterior debido a la reciente adquisición de su licencia por parte de la STT de Bogotá con el propósito de satisfacer de mejor ma-

nera sus propias necesidades técnicas y las necesidades de la población bogotana.

El hecho de que esta última plataforma sea, adicionalmente, la más utilizada por la comunidad académica en el país [34, 35, 40] se debe en gran medida a su capacidad de analizar tanto las intersecciones semaforizadas en sí mismas, como la interacción entre el flujo vehicular, los peatones y los usuarios de bicicletas [25]. Lo anterior, ligado con la capacidad de generar ambientes de tres dimensiones sobre entornos creados en dos dimensiones le proporciona a los usuarios de VISSIM numerosas ventajas.

Del mismo modo, así como en algunos proyectos académicos en Colombia se utilizan diversas plataformas comerciales como SYNCHRO [32], SIDRA [33], TRANSYT-7F [36, 37], Transmodeler [39] y TransCAD [48, 49] entre otros, el nivel de alcance y alto costo de la mayoría de estos paquetes ha impulsado la iniciativa de creación de plataformas de microsimulación por parte de la comunidad académica colombiana. Estos proyectos (siguiendo la iniciativa de proyectos como el de MIT, entre otros [1]) no sólo procuran caracterizar las redes urbanas como en los casos de [38, 50] sino también analizar situaciones no convencionales que se presentan con frecuencia en las ciudades colombianas como accidentes y similares [41, 51, 52].

CONCLUSIONES

Analizando las iniciativas nacionales mencionadas anteriormente, cabe resaltar el supuesto común inicial (y posterior conclusión) de que el desempeño de las estrategias aplicadas actualmente por las autoridades gubernamentales está lejos de ser ideal, debido a que no se ajustan de manera apropiada a entornos como los de las ciudades colombianas (en términos de presupuesto, funcionamiento, metas, indicadores de desempeño y demás, como se sugiere en [20, 33]).

Teniendo esto en cuenta y, con base en casos de éxito observados alrededor del mundo tras la implementa-

ción de varias de las estrategias ya mencionadas, se puede concluir que para un entorno como el de las ciudades colombianas sería ideal la aplicación de esquemas de control sensibles al tráfico como MOVA, SCOOT y SCATS. Sin embargo, gracias a su bajo costo de implementación, es más apropiado considerar estrategias de control de tiempo fijo como TRANSYT y MAXBAND, entre otras.

Adicionalmente, gracias a que se pueden acoplar a la gran variabilidad de infraestructura vial e idiosincrasia encontrada a lo largo del país, vale la pena resaltar que una muy buena alternativa para la selección de estrategias de control es el desarrollo de esquemas específicos para los entornos colombianos, con el apoyo tanto por parte de entes privados como públicos. Por otro lado, es posible concluir que las autoridades distritales de Bogotá cuentan con muy buenas herramientas para llevar a cabo la planeación, simulación y observación de los sistemas de tráfico, en comparación a las alternativas disponibles en otros países. Sin embargo, para que estas herramientas puedan ser aprovechadas en todo su potencial es necesario que las administraciones tengan una clara disposición para la inversión respecto a la infraestructura de los sistemas de control y al personal capacitado para su manejo. Esto podría favorecerse por medio de proyectos de investigación que sean financiados por los entes públicos.

Finalmente, es importante recalcar el hecho de que la mayoría de las iniciativas nacionales en esta área son proyectos de grado o tesis de maestría de diversas universidades colombianas. Si bien esto es un indicador positivo del compromiso y acercamiento de la academia a problemas de tráfico urbano, la baja disponibilidad y difícil consecución de estas referencias, así como la ausencia de artículos y publicaciones en revistas indexadas sobre estas temáticas, indican que ha habido muy pocos avances nacionales en este campo respecto a los avances que se han observado a nivel internacional. En otras palabras, sería importante que los investigadores divulgáramos más nuestros trabajos a nivel internacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a Álvaro Rodríguez y a las personas de SIT por sus aportes en diversos aspectos de éste y otros trabajos relacionados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Q. Yang.

A simulation laboratory for evaluation of dynamic traffic management systems. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, June 1997.

[2] M. Dotoli, M. Fanti and C. Meloni.

“A signal timing plan formulation for urban traffic control”. *Control Engineering Practice*. Vol. 14, No. 11, 2006, pp. 1297–1311.

[3] M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos and Y. Wang.

“Review of road traffic control strategies”. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 12, 2003, pp. 2043–2067.

[4] S. Spinel.

Estimación de la capacidad del diseño de la troncal de la Caracas para Transmilenio. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2003.

[5] R. Vargas.

Análisis de los factores de congestión vehicular para la malla arterial principal de Bogotá D.C. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2003.

[6] J. Acevedo.

“Retos del transporte urbano en Colombia”. *Revista Uniandinos*, Vol. 173, Marzo 2009, pp. 12–14.

[7] A. Al-Mudhaffar.

Impacts of traffic signal control strategies. Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, 2006.

- [8] **K. Aboudolas, M. Papageorgiou and E. Kosmatopoulos.**
“Control and optimization methods for traffic signal control in large-scale congested urban road networks”. *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, July 2007, pp. 3132–3138.
- [9] **G. Abu-Lebdeh and R. Benekohal.**
“Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials”. *Transportation Research Record*, Vol. 1603, 1997, No. 1, pp. 119–127.
- [10] **S. Adams and L. Yu.**
“An evaluation of traffic simulation models for supporting its development”. Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University, Tech. Rep., October 2000.
- [11] **S. Algers, E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Di Taranto, M. Dougherty, K. Fox and J. Gabard.**
“Review of micro-simulation models”. *Rep. SMARTTEST/D*, Vol. 3, 1998, pp. 1–111.
- [12] **F. Boillot, J. Blosseville, J. Lesort, V. Motyka, M. Papageorgiou and S. Sellam.** “Optimal signal control of urban traffic networks.” *Road Traffic Monitoring*, Vol. 355, 1992, pp. 75.
- [13] **C. Cortés, L. Pagès and R. Jayakrishnan.**
“Microsimulation of flexible transit system designs in realistic urban networks”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1923, No. 1, 2005, pp. 153–163.
- [14] **S. Sen and K. Head.**
“Controlled optimization of phases at an intersection”. *Transportation science*, Vol. 31, No. 1, 1997, pp. 5–17.
- [15] **F. Wang.**
“Agent-based control for networked traffic management systems”. *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20, No. 5, 2005, pp. 92–96.
- [16] **P. Nájuez and N. Quijano.**
“Honey Bee Social Foraging for Urban Traffic Control”. To appear, *12th IFAC Symposium on Systems and Transportation*, 2009.
- [17] **A. Di Febbraro and N. Sacco.**
“Traffic light regulation to privilege some classes of vehicles in an urban transportation system”. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Engineering in Systems Applications*, 2003.
- [18] **W. Kim.**
“An improved bus signal priority system for networks with nearside bus stops”. Ph.D. dissertation, Texas A&M University, December 2004.
- [19] **M. Crabtree and R. Vincent.**
“Bus priority in mova” *Road Transport Information and Control*, 1998. 9th International Conference on (Conf. Publ. No. 454), April 1998, pp. 85–89.
- [20] **F. Mira.**
“Coordinación de intersecciones reguladas por semáforos y sus impactos en el sitm Transmilenio. Caso de estudio: Avenida Caracas”. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2004.
- [21] **M. Fellendorf.**
“VISSIM: A microscopic simulation tool to evaluate actuated signal control including bus priority”. 64th ITE Annual Meeting Session, Vol. 32, 1994.
- [22] **P. Mirchandani, L. Head, A. Knyazyan and W. Wu.**
“An Approach Towards The Integration of Bus Priority, Traffic Adaptive Signal Control, and Bus Information/Scheduling System”. 8th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transportation at Berlin, Germany, 2000.
- [23] **M. Janos and P. Furth.**
“Bus priority with highly interruptible traffic signal control: simulation of San Juan’s Avenida Ponce de Leon”. *Transportation Research Record*, Vol. 1811, No.-1, 2002, pp. 157–165.

- [24] **N. Hounsell, F. McLeod and B. Shrestha.**
“Bus priority at traffic signals: investigating the options”.
12th IEE International Conference on Road Transport Information and Control, 2004. RTIC 2004, pp. 287–294.
- [25] **STT.** *Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte*. 2005.
- [26] **R. Allsop.**
“SIGSET: A computer program for calculating traffic signal settings”. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 12, No. 2, 1971.
- [27] _____,
“SIGCAP: A computer program for assessing the traffic capacity of signal-controlled road junctions”. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 17, 1976, pp. 338–341.
- [28] **A. Davol.**
Modeling of Traffic Signal Control and Transit Signal Priority Strategies in a Microscopic Simulation Laboratory. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [29] **M. Papageorgiou, M. Ben-Akiva, J. Bottom, P. Bovy, S. Hoogendoorn, N. Hounsell, A. Kotsialos and M. McDonald.**
“ITS and Traffic Management, ser”. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Vol. 14, Ch. 11, 2007, pp. 715–774.
- [30] **K. Wood, J. Palmer and R. Bretherton.**
“Congestion analysis and diagnosis in utc networks”.
Presentado en: *Road Traffic Monitoring and Control*, 1994.,
Seventh International Conference on, Apr 1994,
pp. 172–176.
- [31] **D. Robertson and R. Bretherton.**
“Optimizing networks of traffic signals in real time-the scootmethod”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,
Vol. 40, No. 1 Part 2, 1991, pp. 11–15.
- [32] **L. Sabogal.**
Análisis de tráfico del sistema Transmilenio. Tesis de Maestría,
Universidad de los Andes, 2003.
- [33] **D. Cuevas.**
Verificación de criterios de semaforización desde el punto de vista peatonal. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2005.
- [34] **P. Ñañez.**
Honeybee social foraging for urban traffic control. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2009.
- [35] **E. Cano.**
Aplicación del programa de simulación de redes de tránsito vissim para la generación de medidas de gestión de tráfico en sectores críticos de la ciudad de Bogotá. Tesis de Maestría, Universidad Nacional, 2006.
- [36] **W. Castro.**
Aplicación del programa transyt 7 f para el diseño de redes de semáforos en Santafé de Bogotá. Tesis de Maestría, Universidad Nacional, 2000.
- [37] **E. Nantes.**
Diseño de ciclos semafóricos de la red vial de las localidades de barrios unidos y Tensaquillo utilizando transyt - 7f. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.
- [38] **D. Jaramillo.**
Simulación y control de tráfico vehicular por semaforización. Tesis de Maestría, Universidad Pontificia Bolivariana, 2005.
- [39] **D. Romero.**
Evaluación del programa de microsimulación para redes de tránsito transmodler y su aplicación en un sector de Bogotá D.C. Tesis de Maestría, Universidad Nacional, 2006.
- [40] **I. Baquero.**
Aplicación del programa vissim 3.70 para la evaluación y diagnóstico de redes congestionadas mediante la simulación del transporte público y el tráfico urbano: caso Popayán. Tesis de Maestría, Universidad Nacional, 2004.
- [41] **A. Alzate and D. Hurtado.**
Análisis y diseño de un sistema de información inteligente para la planificación de intersecciones y redes coordinadas de semáforos en las ciudad de Manizales. Tesis de Maestría, Universidad de Manizales, 2007.

[42] J. Núñez-Flores.

“El sae de Transmilenio: Sistema de gestión de flotas para el transporte masivo de Bogotá”. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, Vol. 140, 2005, pp. 139–145.

[43] M. Lighthill and G. Whitham.

“On Kinematic Waves. I. Flood Movement in Long Rivers,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* (1934-1990), Vol. 229, No. 1178, 1955, pp. 281–316.

[44] _____,

“On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* (1934-1990), vol. 229, no. 1178, 1955, pp. 317–345.

[45] M. Cremer and M. Papageorgiou.

“Parameter identification for a traffic flow model”. *Automatica*, Vol. 17, No. 6, November 1981, pp. 837–843.

[46] S. Adams.

An evaluation of 3-d traffic simulation modeling capabilities. Center for Transportation Training and Research Texas Southern University, Tech. Rep., June 2007.

[47] F. Fang and L.

Elefteriadou. “Some guidelines for selecting microsimulation models for interchange traffic operational analysis”. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, 2005, p. 535.

[48] C. Rosales.

Aplicación de la metodología de cálculo del factor de utilización de la capacidad (icu) de intersecciones semaforizadas en el software Transcad. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2006.

[49] J. Junca.

Análisis conexión vial carrera 11 entre calle 100 y calle 106 de Bogotá, visto desde el usuario. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2005.

[50] M. Bedoya.

Simulador microscópico de redes viales. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2000.

[51] J. Osorio.

Desarrollo e implementación de un modelo de simulación de tráfico para comportamientos no convencionales de conductores. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2003.

[52] S. Ordoñez.

Plataforma de micro-simulación escalable y multimodal para evaluar movilidad urbana en escenarios no convencionales. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, 2009.